

# Оптимальный режим остановки реактора при проведении кратковременных работ

В. Н. АРТАМКИН, Л. П. БАБИКОВА, Р. П. ФЕДОРЕНКО

УДК 621.039.56

В опубликованной ранее работе [1] решена задача о нахождении такого режима изменения мощности реактора в зависимости от времени, который позволяет обеспечить минимальное (при заданном времени остановки) значение максимальной концентрации ксенона. В появившихся с тех пор работах [2—5] поставлено и решено несколько задач, связанных с оптимизацией режима управления реактором.

В настоящей работе отыскивается такой режим остановки реактора, который при минимальном времени управления  $T$  позволяет обеспечить заданное значение концентрации ксенона в некоторый заданный момент времени после остановки. Решается задача оптимального управления на быстродействие при наличии ограничений на управление [ $0 \leq \Phi(t) \leq \Phi_{\max}$ ] и на фазовую переменную [ $x^0(t) \leq x^*$  для  $0 \leq t \leq T$ ]. Такого рода управление может оказаться полезным, когда на остановленном реакторе должны быть проведены работы продолжительностью, превышающей время, в течение которого реактор попадает в подножную яму. Подобная задача рассмотрена в работе [5]. Оптимальное управление находят приближенным методом, разработанным Р. П. Федоренко. Метод подобен изложенному в работе [1]. Используемый алгоритм не требует большой оперативной памяти вычислительной машины и высокой скорости ее работы.

Уравнения изменения концентраций ксенона и пода (см. работу [1]) записываются в виде

$$\left. \begin{aligned} f_1(x, \Phi) &= \frac{dx^0(t)}{dt} = Ax^1(t) + B\Phi(t) - Cx^0(t) - Dx^0(t)\Phi(t); \\ f_2(x, \Phi) &= \frac{dx^1(t)}{dt} = -Ax^1(t) + E\Phi(t), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $x^0(t)$  — концентрация ксенона;  $x^1(t)$  — концентрация пода;  $\Phi(t)$  — нейтронный поток.

Начальные условия при этом следующие:

$$x^0(0) = a; \quad x^1(0) = b. \quad (2)$$

На поток нейтронов наложены ограничения

$$0 \leq \Phi(t) \leq \Phi_{\max} \quad \text{для} \quad 0 \leq t \leq T,$$

на концентрацию ксенона

$$x^0(t) \leq x^* \quad \text{для} \quad 0 \leq t \leq T.$$

Задача состоит в том, чтобы найти такое изменение нейтронного потока, которое за минимальное время  $T$  обеспечило бы возможность проведения на реакторе работ в течение заданного времени  $\tau$ , т. е.

$$x(T + \tau) \leq x^*.$$

Поставленная задача решается в следующем порядке:

1) в качестве закона управления выбирается произвольная кусочно-постоянная функция  $\Phi(t)$  так, чтобы  $0 \leq \Phi_i(t) \leq \Phi_{\max}$  для всех  $t \in [t_i, t_{i+1}]$  при  $i = 1, \dots, n$ ;

2) численно решается система дифференциальных уравнений на отрезке  $[0, T]$  с заданными начальными данными;

3) на отрезке  $[0, T]$  выбирается  $m$  точек  $t_1, \dots, t_m$ , к которым добавляется точка  $t_{m+1} = T + \tau$ ;

4) решается задача о переходе к новому управлению  $\tilde{\Phi}(t) = \Phi(t) + \delta\Phi(t)$  так, чтобы обеспечить  $\min T$  при  $x^0(t_i) \leq x^*$ ,  $i = 1, \dots, m + 1$ ;

$$0 \leq \Phi(t) \leq \Phi_{\max},$$

т. е. от непрерывного ограничения на концентрацию ксенона переходим к дискретному.

С полученной в результате решения этой задачи величиной  $\tilde{\Phi}(t)$  процедура повторяется до тех пор, пока условие  $x^0(t) \leq x^*$  не будет выполняться для всех  $t \in [0, T]$  с заданной точностью. В качестве точек  $t_i$  берутся такие, в которых  $x^0(t)$  достигает наибольшего максимума. Таким образом, точки  $t_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) «следят» за выполнением условия  $x^0(t) \leq x^*$ .

Прежде чем перейти к решению задачи, установим, как изменяется  $x^0(t_i)$  для  $i = 1, \dots, m + 1$  при переходе  $\Phi(t) \rightarrow \tilde{\Phi}(t)$ :

1. При

$$\Phi(t) \rightarrow \tilde{\Phi}(t) = \Phi(t) + \delta\Phi(t)$$

$$x(t) \rightarrow \tilde{x}(t) = x(t) + \delta x(t).$$

Из (1) и (2) получим

$$L(\Phi, x)\delta x = M(x, \Phi)\delta\Phi; \quad (3)$$

$$\delta x(0) = 0,$$

где  $L(\Phi, x)$  — дифференциальный оператор;  $M(x, \Phi)$  — матрица;

$$x(t) = [x^0(t), x^1(t)];$$

$$\delta x(t) = [\delta x^0(t), \delta x^1(t)].$$

Если известны два дифференциальных уравнения

$$\frac{dx}{dt} = Ax + a; \quad (4)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = -A^*\psi + b \quad (5)$$

с начальными условиями

$$x(0) = 0 \quad \text{и} \quad \psi(T) = -C,$$

где  $A$  — матрица;  $a, b$  — векторы;  $-A^*$  — сопряженная матрица, то справедливо равенство

$$\int_0^T (b, x) dt + [C, x(T)] = \int_0^T (-a, \psi) dt.$$



В нашем случае систему (5) запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi^0}{dt} &= C\psi^0 - Du\psi^0 + \delta(t-t_i); \\ \frac{d\psi^1}{dt} &= -A\psi^0 + A\psi^1 \end{aligned} \quad (6)$$

или в операторной форме  $L*\psi = b$ .  
Если примем  $\psi(T) = 0$ , получим

$$\int_0^T (\psi L \delta x - \delta x L^* \psi) dt = 0, \quad (7)$$

где  $\psi$  — решение дифференциального уравнения (6) с начальным условием  $\psi(T) = 0$  и условием скачка

$$\begin{aligned} \psi^0(t_i - 0) - \psi^0(t_i + 0) &= 1; \\ \psi^1(t_i - 0) - \psi^1(t_i + 0) &= 0. \end{aligned}$$

Из (7) следует, что

$$\delta x^0(t_i) = \int_0^T \delta x^0(t) \delta(t-t_i) dt = \int_0^T \psi M(x, \Phi) \delta \Phi dt.$$

Так как  $\Phi(t)$  — кусочно-постоянная функция, то

$$\delta x^0(t_i) = \sum_{j=1}^{n_1} \delta \Phi_j \int_{t_j}^{t_{j+1}} \{\psi^0(t) [B - Dx^0(t)] + \psi^1(t) E\} dt$$

или

$$\delta x^0(t_i) = \sum_{j=1}^{n_1} \delta \Phi_j h_j, \quad \text{где } i=1, \dots, m.$$

2. Пусть теперь  $T \rightarrow T + \delta T$ . В этом случае справедливо равенство

$$[\delta x(t_i), \psi(t_i)] = [\delta x(t_j), \psi(t_j)].$$

Приняв

$$\begin{aligned} \psi^0(t_i) &= 1; \\ \psi^1(t_i) &= 0, \end{aligned}$$

получим

$$\delta x^j(t_j) = \left[ \psi(t_j), f(t_j) \frac{T}{n_1} \right], \quad \text{где } \delta x(t_j) = f(t_j) \frac{T}{n_1}.$$

3. Рассмотрим изменение концентраций ксенона в точке  $T + \tau$ . При  $\Phi(t) \rightarrow \Phi(t) + \delta \Phi(t)$  аналогично изложенному выше

$$\begin{aligned} \delta x(T + \tau) &= \int_0^{T+\tau} \delta x^0(t) \delta[t - (T + \tau)] dt = \\ &= \int_0^T \psi M(x, u) \delta \Phi dt, \end{aligned}$$

так как  $\delta \Phi(t) = 0$  для  $T \leq t \leq T + \tau$ . При  $T \rightarrow T + \delta T$  нетрудно заметить, что

$$\delta x(T) = -\delta T [f_-(T) - f_+(T)].$$

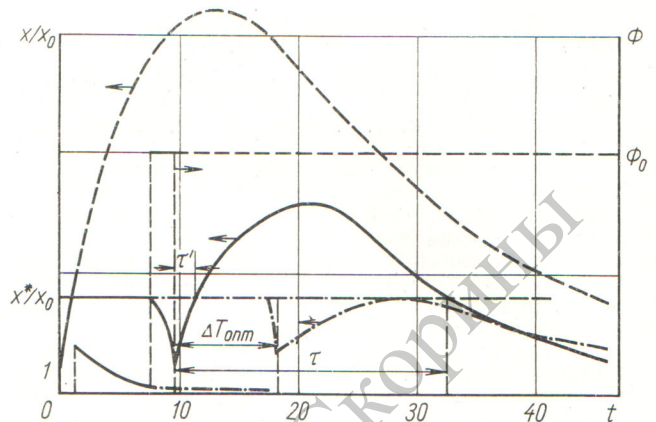


Рис. 1. Сравнение трех возможных режимов останова реактора.

— — — мгновенная остановка реактора; — — — результаты, полученные данным методом для времени проведения работ на реакторе  $\tau$  (или  $\tau'$ ); — · — · — результаты, полученные методом, описанным в работе [1], для пуска реактора в произвольный момент времени после останова.

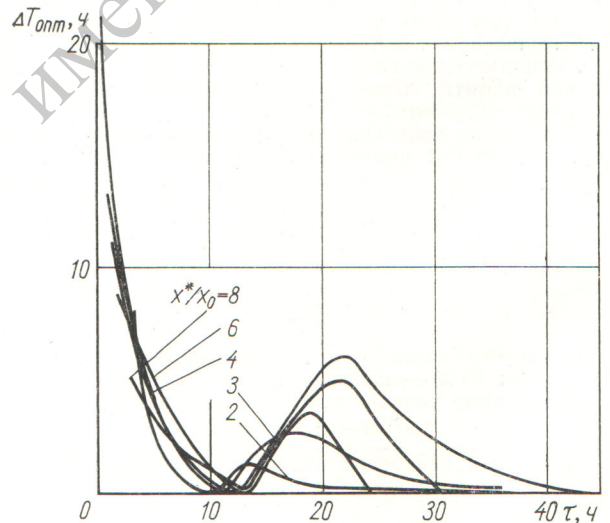


Рис. 2. Сравнение выигрыша во времени, полученного описанным методом, с найденным в работе [1].

Из сказанного заключаем, что наша задача сводится к следующей задаче линейного программирования: найти  $\min T$  при условиях

$$\sum_{j=1}^{n_1} \delta \Phi_j h_j^i + \frac{1}{n_1} \sum_{j=2}^{i-1} [\psi(t_j), f(t_j)] \delta T \leq x^*, \quad i=1, \dots, m;$$

$$\sum_{j=1}^{n_1} \delta \Phi_j h_j^{m+1} + [\psi(T), (f_- - f_+)] \delta T \leq x^*;$$

$$0 \leq \Phi_j + \delta \Phi_j \leq \Phi_{\text{макс}}, \quad j=1, \dots, n_1.$$



Полученное уравнение  $\Phi(t)$  имеет такой же вид, как и в работе [1]: вначале  $\Phi(t) = 0$ , а концентрация ксенона быстро растет. Как только концентрация ксенона достигает предельно допустимого значения, поток меняется так, чтобы в течение некоторого времени удерживалось это значение концентрации. На последней стадии управления  $\Phi(t) = \Phi_{\text{макс}}$ . Найденный режим управления совпадает с предложенным в работе [5].

На рис. 1 схематически показано изменение концентрации ксенона для трех случаев.

Сравнение кривых показывает, что время остановки, полученное в работе [1], удается уменьшить в данном случае на  $\Delta T_{\text{ост}}$ . На рис. 2 показан этот выигрыш во времени в зависимости от  $\tau$  и при разных значениях

$x^*/x_0$  для реактора с  $\Sigma_f \Phi_0 = 0,2582 \cdot 10^{14}$  нейтр/см<sup>3</sup>·сек и  $\sigma_{\text{Xe}} = 1,77 \cdot 10^6$  барн.

Поступило в Редакцию 10/XI 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Артамкин и др. «Атомная энергия», 17, 189 (1964).
2. M. A. s. h. Nucl. Sci. and Engng, 34, 77 (1966).
3. O. Roberts, H. Smith. Nucl. Sci. and Engng, 22, 470 (1965).
4. Z. Rosztoczy, L. Weaver. Nucl. Sci. and Engng, 20, 318 (1964).
5. C. Woodcock, A. Babb. Trans. Amer. Nucl. Soc., 8, 235 (1965).

Поток нейтронов в реакторе ВВР-С после его остановки

Е. М. ЛОБАНОВ, А. В. ЯНГОВСКИЙ, М. СУЛТАНХОДЖАЕВА

УДК 621.039.512.45

В ряде работ приводятся результаты измерений потока нейтронов в активной зоне реактора после его остановки. Такие измерения выполнены главным образом для графитовых и тяжеловодных реакторов, а также для реакторов с бериллиевым отражателем. В работах [1—3] установлено наличие остаточного потока нейтронов, найдены его временные характеристики. В отношении причин, приводящих к образованию остаточного потока нейтронов, высказано два предположения: 1) фоторасщепление ядер дейтерия с вылетом нейтронов; 2) испускание запаздывающих нейтронов продуктами деления [1, 4].

В настоящей работе был измерен поток нейтронов в каналах реактора ВВР-С спустя длительное время после его остановки. Измерения проводились при

помощи активационных детекторов (фольги из индия полупроводниковой чистоты, которая необходима для ожидаемой малой величины потока). Наведенная  $\beta$ -активность изотопа  $\text{In}_{115}^{116}$  измерялась торцовым счетчиком. При регистрации  $\beta$ -частиц среднее квадратичное отклонение не превышало 6%. Предварительно фольги калибровались в известном потоке нейтронов, создаваемом калиброванным нейтронным источником.

Результаты измерений, выполненных в одинаковых геометрических условиях, приводились к активности при насыщении в момент окончания облучения. С целью оценки потока резонансных нейтронов фольги из индия облучались в фильтре из кадмия толщиной 1 мм. Некоторые значения потока нейтронов в вертикальных каналах реактора ВВР-С приведены в табл. 1.

Потоки нейтронов в вертикальных каналах реактора ВВР-С после его остановки

Таблица 1

Время, прошедшее после остановки, ч	Поток нейтронов, нейтр/см <sup>2</sup> ·сек					
	Центр активной зоны		Восьмой вертикальный канал		Первый канал тепловой колонны	
	тепловые	резонансные	тепловые	резонансные	тепловые	резонансные
75	$2,5 \cdot 10^4$	$3,4 \cdot 10^3$	—	—	$8,3 \cdot 10^2$	$2,0 \cdot 10^2$
245	—	—	$7,6 \cdot 10^3$	$8,8 \cdot 10^2$	—	—
270	—	—	$6,7 \cdot 10^3$	$7,0 \cdot 10^2$	—	—
294	$1,6 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^3$	$6,6 \cdot 10^3$	$5,9 \cdot 10^2$	—	—

Сопоставление потоков нейтронов в вертикальных каналах работающего и остановленного реактора ВВР-С

Таблица 2

Условия измерений	Номер канала								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Работающий реактор	$2,34 \cdot 10^{13}$	$2,58 \cdot 10^{13}$	$2,39 \cdot 10^{13}$	—	$1,90 \cdot 10^{13}$	—	$1,78 \cdot 10^{13}$	$1,98 \cdot 10^{13}$	—
Остановленный реактор	$5,8 \cdot 10^3$	$6,3 \cdot 10^3$	$5,6 \cdot 10^3$	$4,9 \cdot 10^3$	$3,4 \cdot 10^3$	$4,2 \cdot 10^3$	$4,3 \cdot 10^3$	$4,9 \cdot 10^3$	$4,2 \cdot 10^3$